动 物 学 研 究 2005, Dec. 26 (6): 609-615 CN 53-1040/Q ISSN 0254-5853
Zoological Research

氮沉降对三种林型土壤动物群落生物量的影响

徐国良[1,2], 莫江明[1,*], 周国逸[1]
(1. 中国科学院华南植物园 鼎湖山森林生态系统定位研究站, 广东 肇庆 526070;
2. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要: 从2003年5月~2004年8月, 在华南鼎湖山地区针叶林、混交林和季风林内, 采用模拟的方法, 构建了对照、低氮[50 kg/(hm²·a)]和中氮处理[100 kg/(hm²·a)]组。在以后近16个月内, 利用线框法收集地表凋落物层, 在实验室内用Tullgren干漏斗法采集土壤动物标本, 最后根据本地区长期土壤动物研究得出的不同类群动物生物量标准, 对土壤动物类群生物量在氮沉降下的响应进行研究。结果表明, 整体上氮处理对土壤动物类群生物量并未产生显著影响。然而通过氮处理与取样期和林分的交互作用, 土壤动物类群生物量对氮沉降有一定的响应趋势。外界的氮输入明显促进了针叶林土壤动物类群生物量的增长, 正效应明显; 而季风林在较高氮处理下的负效应明显。经历一周年后, 土壤动物类群生物量在各林分中的分布格局发生了显著变化, 由实验处理前的季风林>混交林>针叶林, 变为针叶林>季风林>混交林。低氮处理在一定程度上显示了对土壤动物类群生物量发展的利好作用, 各林分动物类群生物量都有不同幅度的上升, 平均季风林为44.33%, 混交林9.19%, 针叶林60.66%; 而中氮处理使季风林和混交林分别下降32.55%和2.81%。提示氮沉降对土壤动物类群生物量的影响可能也存在阈值作用。

关键词: 土壤动物类群; 生物量; 氮沉降; 森林生态系统
中图分类号: Q958.15 **文献标识码**: A **文章编号**: 0254-5853 (2005) 06-0609-07

Responses of Soil Fauna Biomass to N Deposition in Three Forests in Subtropical China

XU Guo-liang[1,2], MO Jiang-ming[1,*], ZHOU Guo-yi[1]
(1. *Dinghushan Forest Ecosystem Research Station, South China Botanical Garden, the Chinese Academy of Sciences, Zhaoqing 526070, China;*
2. *Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China*)

Abstract: Impacts of simulated atmospheric nitrogen (N) deposition on soil fauna biomass were studied in a 16 month period from May 2003 to August 2004. Plots were built in pine forest (PF), pine and broad-leaf mixed forest (MF) and monsoon evergreen broad-leaf forest (MEBF) in Dinghushan of subtropical China. Dissolved NH_4NO_3 equivalent to the control (No addition), low [50 kg/(hm²·a)], and medium [100 kg/(hm²·a)] was sprayed during the testing period. The biomass of soil fauna group was decided by an experimental standard based on research performed a long time in this area. When the data was averaged throughout the period and across the forests, there were no significant effects of N treatment on soil fauna biomass. However, effects could be observed in the interactions between N and forest type, and the interactions between N and sampling date. There were obviously positive effects of N treatment on soil fauna biomass in PF, but negative effects under abundant N deposition in MEBF. After one year the distribution of soil fauna biomass in different forests was changed significantly, with MEBF > MF > PF before the treatments and PF > MEBF > MF after the treatments. Low N treatment was positive to soil fauna biomass to a certain extent, which increased soil fauna biomass by 44.33% in MEBF, 9.19% in MF and 60.66% in PF; but soil fauna biomass declined generally under the medium treatment, 32.55% in MEBF and 2.81% in MF. The results indicated that there might be a threshold in the effects of N deposition on soil fauna biomass.

收稿日期: 2005-07-08; 接受日期: 2005-10-08
基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (30270283, 30470306); 中国科学院知识创新工程重要方向项目 (KSCX2-SW-120); 中国科学院华南植物研究所所长基金资助项目; 广东省自然科学基金资助项目 (021524)
* 通讯作者 (Corresponding author)
第一作者简介: 徐国良 (1975-), 男, 在职博士生, 主要从事森林生态系统土壤动物结构、功能及其与全球变化的关系研究。E-mail: xugl75@126.com

Key words: Soil fauna; Biomass; N deposition; Forest ecosystem

氮沉降是指大气中的活性氮从大气转移到地表的过程。由于人类活动引发的氮沉降问题始于工业化较早的欧洲和北美地区，至今，中欧森林大气氮输入已大大超过了森林的年需要量［一般 25 kg/(hm^2·a) 为临界点；Aber，1998］；在美国东北部，当前氮沉降率比本底水平增加了 10～20 倍（Magill et al，1997）。我国也已经出现了较严重的氮沉降问题，如广东省广州市 1988 年降水氮沉降量已达 45.6 kg/（hm^2·a）（Ren et al，2000）。总体而言，我国已成为全球三大氮沉降集中区（分别为欧洲、美国和中国）之一（Fenn et al，1998；Hall et al，1999）。

大量而持续的氮沉降对陆地生态系统的组成及其功能造成了深刻的影响，对生态环境带来了严重的冲击（Vitousek，1997）。许多学者对氮沉降下植物生物量的反应进行了大量研究，认为当植物生长受氮限制时，一定程度的氮沉降增加植物生产力，但氮过量后，植物生产力则下降（Magill et al，2000；McNulty et al，1996；Boxman et al，1998）。

绝大部分沉降氮最终将进入土壤中。土壤动物是一个十分庞大的群体，其生物量大约相当于全球 60 亿人口的 10 倍：因此，在陆地生态系统中按生物量来说，占首位的不是系统发育最高的脊椎动物，也不是征服地球的人类，而是生活于土壤中的动物（Zhang，1980），但是对于这一庞大功能群体生物量在大气氮沉降下的响应还未见报道。

本研究为鼎湖山大尺度氮沉降野外研究项目的土壤动物学专项，通过由针叶林、混交林和季风林 3 个生态系统构成的实验系统，在一年内，对土壤动物群落生物量在不同氮沉降量、植被及取样期等的影响下产生的响应进行了研究。

1 方 法

1.1 研究地区自然概况

鼎湖山自然保护区位于广东省肇庆境内（23°08′N，112°35′E），距广州市 86 km，地处南亚热带的南缘，总面积 1 155 hm^2，为大起伏山地。属亚热带季风气候，年太阳总辐射约 4 655 MJ/m^2，年平均日照时数为 1 433 h，年平均气温 20.9 ℃。该区雨量充沛，年降雨量达 1 900 mm，但分布不均，4～9 月为雨季，10～3 月为旱季，每年还受到数次热带气旋或台风的影响（Hou et al，2002）。鼎湖山主要有砖红壤性红壤和黄壤两大类，土壤酸度较大，pH 值约 4.2～5.0（Hou et al，2002）。

马尾松林（*Pinus massoniana* forest，PF）、马尾松针阔叶混交林（pine and broad-leaf mixed forest，MF，简称混交林）和季风常绿阔叶林（monsoon evergreen broad-leaf forest，MEBF，简称季风林）是当地 3 种代表性植被。季风常绿阔叶林样地的母岩为沙页岩，土壤为赤红壤，土层较深（60～90 cm）；混交林样地的母岩为沙岩，土壤为砖红壤性红壤，土层厚薄不均，一般在 30～60 cm；马尾松林样地的母岩也为沙岩，土壤也为砖红壤性红壤，土层较浅，一般不超过 30 cm（Mo et al，2003）。

1.2 方法

1.2.1 实验设计 2002 年 10 月 25 日，建立森林实验样地：季风常绿阔叶林包括 12 个 10 m×20 m 样方；混交林与马尾松林各 9 个 10 m×20 m 样方。样方之间留有足够宽的地带（约 10 m），以防止相互干扰。为增加研究结果的可比性，根据本地区的氮沉降情况、氮处理的强度和频度，参考国际上同类研究的处理方法（Gundersen et al，1998），将实验分 3 个处理组，分别为对照（Control，未施氮，代以同量的水）、低氮处理［Low，50 kg/(hm^2·a)］和中氮处理［Medium，100 kg/（hm^2·a)］（注：不包括大气沉降的氮量）组，每个处理组取 3 个重复（即同一林型同一处理组由随机选择的 3 个样方组成）。从 2003 年 7 月中旬开始，每月初喷施 NH_4NO_3。除了施氮处理外，各样地的其余处理措施均保持一致。

1.2.2 采样 在 2003 年 7 月初（氮沉降增加前）对所有样地进行了一次土壤动物群落的本底值调查，然后分别于 2003 年 10 月和 2004 年 1、4、8 月又进行了 4 次调查。调查时在每一个样方内按对角线法选取 5 个点，在每一点上，在边长 10 cm 的正方形线框内收集地表层（季风林 2～3 cm，混交林和针叶林 3～5 cm）凋落物，把 5 个点的收集物合并作一个样本，这样每个样方共得到 5 个样本。样品立即带回实验室，用 Tullgren 干漏斗法收集土壤动物标本。

1.2.3 分析、鉴定方法 除螨类外，所有标本都鉴定至科(总科)(Yin,1998;Zhen & Gui,1999)。根据廖崇惠先生长期在鼎湖山地区进行大量的土壤动物学研究后建立的不同植被下土壤动物各类群生物量水平经验标准（Liao，1996)，本研究建立了土壤动物各类群个体生物量标准（表1)。

采用Three-way ANOVA方法分析氮处理、林分和取样期及其交互作用对土壤动物群落生物量的影响；利用Duncan多重检验进行不同水平间的差异显著性检验。所有统计均在SPSS11.5软件下实现。

表1 鼎湖山3种生境土壤动物各类群个体生物量标准

Tab. 1 Criterion of soil fauna individual biomass in three forests of Dinghushan (g)

土壤动物类群 Soil fauna group	季风林 Monsoon evergreen broad-leaf forest	混交林 Pine and broad-leaf mixed fores	针叶林 *Pinus massoniana* forest
弹尾类 Collembola	1.41×10^{-5}	1.42×10^{-5}	1.39×10^{-5}
螨类 Mite	8.43×10^{-5}	9.52×10^{-5}	7.58×10^{-5}
蚁类 Ant	5.14×10^{-3}	8.33×10^{-4}	1.04×10^{-3}
原尾类 Protura*	1.41×10^{-5}	1.42×10^{-5}	1.39×10^{-5}
双尾类 Diplura*	1.41×10^{-5}	1.42×10^{-5}	1.39×10^{-5}
综合类 Symphyla*	1.41×10^{-5}	1.42×10^{-5}	1.39×10^{-5}
虫蜀虫戋类 Pauropoda*	1.41×10^{-5}	1.42×10^{-5}	1.39×10^{-5}
蜚蠊类 Blattoptera	2.20×10^{-2}	4.00×10^{-3}	2.86×10^{-3}
石蜈蚣类 Lithobiomorpha	1.50×10^{-2}	1.06×10^{-2}	1.77×10^{-3}
地蜈蚣类 Geophilomorpha	1.90×10^{-2}	6.75×10^{-3}	1.52×10^{-2}
蜈蚣类 Scoloenpdromorpha	6.30×10^{-2}	3.80×10^{-2}	3.80×10^{-2}
马陆类 Diplopoda	2.10×10^{-2}	2.69×10^{-3}	1.38×10^{-2}
鼠妇类 Isopoda	4.40×10^{-3}	5.15×10^{-3}	5.15×10^{-3}
盲蛛类 Opiliones*	8.43×10^{-5}	9.52×10^{-5}	7.58×10^{-5}
伪蝎类 Pseudoscorpiones*	8.43×10^{-5}	9.52×10^{-5}	7.58×10^{-5}
蜘蛛类 Arachnida	9.10×10^{-3}	4.59×10^{-3}	8.71×10^{-3}
虫齿虫类 Psocoptera*	1.41×10^{-5}	1.42×10^{-5}	1.39×10^{-5}
缨翅类 Thysanoptera*	1.41×10^{-5}	1.42×10^{-5}	1.39×10^{-5}
鞘翅目成虫 Coleoptera adult	1.52×10^{-3}	1.75×10^{-2}	3.55×10^{-3}
鞘翅目幼虫 Coleptera larva	6.89×10^{-2}	2.94×10^{-2}	3.95×10^{-2}
鳞翅目幼虫 Lepidoptera larva	3.00×10^{-3}	2.99×10^{-3}	2.58×10^{-2}
双翅目幼虫 Diptera larva	5.94×10^{-5}	4.78×10^{-5}	1.23×10^{-4}
白蚁类 Isoptera	2.80×10^{-3}	2.34×10^{-3}	6.00×10^{-4}
半翅类幼虫 Hemiptera larva*	1.41×10^{-5}	1.42×10^{-5}	1.39×10^{-5}

*对Liao (1996) 未标注生物量的一些不常见、个体微小且数量稀少的类群，本文仅根据体形大小参考其他动物类群给出其生物量标准。

* Some occasional, tiny groups' biomasses not given by Liao (1996) are decided by their sizes compared with other groups.

2 结果与分析

2.1 取样期和林分对土壤动物类群生物量和密度的影响

取样期对土壤动物群落生物量存在显著影响（$P<0.05$）（表2)。无论是样地总体或是对照样地，生物量都经历了先降后升的过程，其中2003年10月和2004年1月，其值显著低于2004年4月（图1)。这是由于自然时律的影响。因为10月至翌年1月，鼎湖山气候渐入干冷时期，限制了土壤动物的繁衍发展。经一年的实验周期后，生物量最终又降到了初始水平。样地总体与对照样地土壤动物生物量密度在整个实验期间几乎保持完全一致。以上结果说明，一年的实验处理并未对总体生物量产生显著影响，但这并不代表实验系统内部无结构性的变化。

取样期与林分间存在显著的交互作用（表2)。季风林土壤动物类群生物量在实验期间经历了明显的先降后升的过程，但最后其值显著低于一年前的水平（$P<0.05$)；针叶林则上升趋势明显，2004年4和8月显著高于2003年7月（$P<0.05$)（表3)。不同取样期各林分生物量密度：实验处理前（2003年7月）季风林显著居高（$P<0.05$)；实验处理后，2003年10月~2004年1月，各林分差异

表 2 氮处理水平、林分和取样期对土壤动物类群生物量影响的 Three-way ANOVA 分析结果（*F* 值）

Tab. 2 *F*-values of effects of nitrogen, forest and sampling date on soil animal biomass

取样期 Sampling date	林分 Forest	氮处理 N treatment [kg / (hm²·a)]	取样期×林分 Sampling date × Forest	取样期×氮处理 Sampling date × N treatment	林分×氮处理 Forest × N treatment
2003 – 07, 2003 – 10, 2004 – 01, 2004 – 04, 2004 – 08	季风林 MEBF, 混交林 MF, 针叶林 PF	对照, 50, 100			
F 15.37**	11.13**	0.15ns	4.11**	2.12*	1.04ns

** $P<0.01$; * $P<0.05$; ns $P>0.05$.

MEBF: Monsoon evergreen broad-leaf forest; MF: Pine and broad-leaf mixed fores; PF: Pinus massoniana forest.

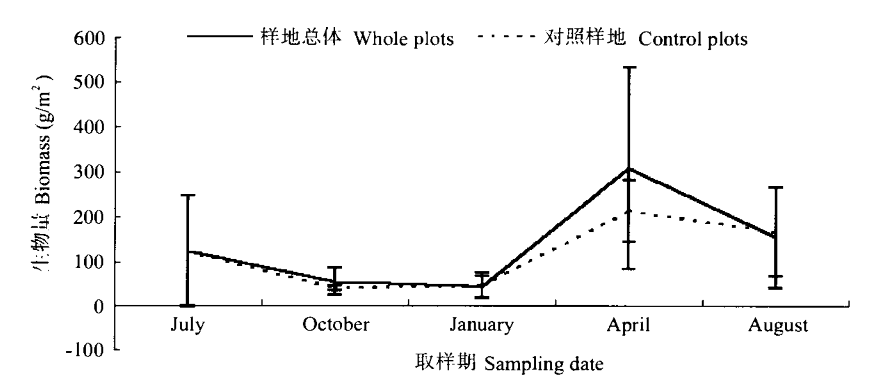


图 1 不同取样期样地总体和对照样地土壤动物类群生物量

Fig. 1 Soil fauna biomass in the whole plots and in control plots during the experimental period

表 3 林分和取样期对土壤动物群落生物量的影响

Tab. 3 Effects of forest and sampling date on soil animal biomass (mean ± *SE*, g)

取样期 Sampling date	季风林 Monsoon evergreen broad-leaf forest	混交林 Pine and broad-leaf mixed fores	针叶林 *Pinus massoniana* forest
2003 – 07	278.89 ± 62.57a A	26.38 ± 4.61c B	66.60 ± 3.58b B
2003 – 10	55.14 ± 23.94b AB	28.64 ± 5.13c B	80.86 ± 30.19b A
2004 – 01	47.32 ± 6.66bB	13.91 ± 6.72c C	68.81 ± 5.15b A
2004 – 04	275.88 ± 175.73a A	152.19 ± 14.59a A	496.35 ± 279.85a A
2004 – 08	112.33 ± 44.64b AB	77.36 ± 16.24b B	271.12 ± 129.68a A

同一列不同小写字母者及同一行不同大写字母者表示差异显著［$P<0.05$，Duncan's 新复极差法(DMRT)］。

Means followed by different lowercase letter within a column and different uppercase letter within a row differ significantly at $P<0.05$, Duncan's multiple range test (DMRT).

不明显；2004 年 1 月以后，各林分都有所增长，但针叶林格外显著；2004 年 8 月，即实验处理一周年后，针叶林 > 季风林 > 混交林，而且针叶林显著为高（$P<0.05$）（表 3），各林分发生了明显变化。因此，虽然初期（自然状态）季风林土壤动物生物量显著为高，但由于实验处理产生的不同效应，使得实验期内整体上季风林与针叶林间无显著差异，但针叶林显著高于混交林（$P<0.05$）。

2.2 氮处理的影响

实验期内整体上氮处理对土壤动物群落生物量未造成显著影响，氮处理与取样期之间存在显著的交互作用（$P<0.05$）（表 2）。低氮处理在大部分时期内都明显高于对照，尤其是在 2004 年 4 月达到高峰，但随后又明显下降，至 2004 年 8 月低于对照水平；中氮处理则与对照相当，未有明显变化（表 4）。可见，低氮处理在一定程度上显示了对土壤动物群落生物量发展的利好作用。

不同林分对氮处理的响应也有一定差异。在氮

处理下，针叶林土壤动物类群生物量明显高于对照，正效应明显；而季风林在中氮处理下负效应明显。此外，与对照比较，低氮处理下，各林分都有不同幅度上升，平均季风林为44.33%，混交林9.19%，针叶林60.66%；而中氮处理使季风林下降32.55%，混交林下降2.81%，但针叶林仍增加43.61%（表5）。

表4 氮处理水平和取样期对土壤动物群落生物量影响

Tab. 4 Effects of nitrogen and sampling date on soil animal biomass (mean ± *SE*, g)

处理 Treatment [kg / (hm²·a)]	2003-07	2003-10	2004-01	2004-04	2004-08
对照 Control	122.48 ± 125.07$^{a\ AB}$	40.63 ± 5.89$^{a\ B}$	45.80 ± 29.13$^{a\ B}$	213.18 ± 68.93$^{a\ A}$	165.50 ± 99.21$^{a\ AB}$
50	145.39 ± 175.88$^{a\ B}$	67.72 ± 36.44$^{a\ B}$	42.57 ± 21.26$^{a\ B}$	477.55 ± 328.55$^{a\ A}$	120.34 ± 23.76$^{a\ B}$
100	103.99 ± 106.32$^{a\ A}$	56.28 ± 40.48$^{a\ A}$	41.67 ± 33.13$^{a\ A}$	233.70 ± 151.69$^{a\ A}$	174.98 ± 195.18$^{a\ A}$

同一列不同小写字母者及同一行不同大写字母者表示差异显著（$P<0.05$，DMRT）。

Means followed by different lowercase letter within a column and different uppercase letter within a row differ significantly at $P<0.05$, DMRT.

表5 氮处理水平和林分对土壤动物群落生物量的影响

Tab. 5 Effects of nitrogen and forest on soil animal biomass (mean ± *SE*, g)

Treatment [kg / (hm²·a)]	季风林 Monsoon evergreen leaf-broad forest	混交林 Pine and leaf-broad mixed fores	针叶林 *Pinus massoniana* forest
对照 Control	148.10 ± 100.75$^{a\ A}$	58.45 ± 49.62$^{a\ A}$	146.00 ± 115.33$^{a\ A}$
50	213.75 ± 185.32$^{a\ A}$	63.82 ± 58.43$^{a\ A}$	234.57 ± 323.15$^{a\ A}$
100	99.89 ± 77.78$^{a\ A}$	56.81 ± 64.45$^{a\ A}$	209.67 ± 177.83$^{a\ A}$

同一列不同小写字母者及同一行不同大写字母者表示差异显著（$P<0.05$，DMRT）。

Means followed by different lowercase letter within a column and different uppercase letter within a row differ significantly at $P<0.05$, DMRT.

3 讨论

就整个实验系统来说，一周年的氮处理并未对土壤动物群落总体生物量产生显著影响，这可能是实验处理时间不够导致的。Gundersen et al (1998)认为，由于森林植物的氮库较大，生态系统初级生产力对施氮的响应较慢，一般需要5年或更长的时间，如在美国一个温带森林的施氮实验中，5~7年后才观察到树木生长对氮处理作出的显著响应(Aber, 1995)；凋落物分解和温室气体排放在欧洲模拟氮沉降研究样地（NITREX）需要2~4年时间才开始观察到外加氮的显著影响（Gundersen et al, 1998)。在本研究中，就实验系统内部各因子交互作用中，土壤动物类群生物量所表现出来的反应趋势仍值得探讨。

虽然土壤动物类群总体生物量类在一年的实验处理过程中未发生显著变化，但是在各林分中的分布格局发生了明显变化。外界的氮输入明显促进了针叶林土壤动物类群生物量的增长，正效应明显，而季风林在较高氮处理下的负效应明显。在鼎湖山，无论是全氮含量还是有效氮含量季风林土壤均约是马尾松林的2倍；季风林植物叶片氮含量、凋落物氮素输入也高于马尾松林，说明季风林生态系统相对于马尾松林明显更富氮，而马尾松林土壤氮素供应力较低（Mo et al, 2003; Zhang et al, 2000)。富氮的生态系统在接受外加氮处理比贫氮的系统更容易表现出氮淋溶，对外加氮的响应也更强烈（Aber et al, 1998; Fenn et al, 1998; Gundersen et al, 1998; Matson et al, 1999; Wright & Rasmussen, 1998)，其原因可能是因为更容易达到氮饱和，而氮饱和后外加氮的持续输入会对生态系统造成一系列负面影响（Foster, 1989; Watmough et al, 1999; Bergkvist et al, 1992; Kros, 1993)。这可能就是导致本研究中富氮的季风林和贫氮的针叶林土壤动物类群落生物量对氮沉降产生明显不同响应模式的原因。

另外，低氮处理在一定程度上显示了对土壤动物类群生物量发展的利好作用。低氮处理下各林分生物量都有不同幅度的上升，而中氮处理下各林分均出现下降，这提示，氮沉降对土壤动物类群生物量的影响可能也存在阈值作用。氮沉降的阈值作用在其他一些研究中也得到证实：许多有关氮沉降对

植物和微生物影响的研究结果证明，一定限度内的氮输入是有利的，但过量的氮沉降则会造成负面影响（Magill et al，2000；Aber et al，1989）。虽然国内外还没有有关氮沉降对森林生态系统土壤动物类群生物量影响的类似研究可以进行比较，但在农业土壤氮素输入对土壤动物的影响研究中，也有认为存在量的问题。如，当土壤有效氮由 69.8 mg/kg 增至 84.7 mg/kg 时，土壤动物密度由 5 375 个/m^2 增至 11 725 个/m^2（Huang & Sheng，1996）；土壤白虫的生物量则与土壤中铵态氮数量呈显著正相关（Sulkava，1996）。但氮输入量过大，情况则不同。玉米地施氮肥（NH_4NO_3，15 g/（m·a）处理 6 年，结果显示蚯蚓数量和生物量显著降低（Whalen et al，1998）；在高强度（40 g/（m^2·a^1）氮处理地，线虫的成熟度指数显著降低（Sarathchandraa，2001）。

氮处理在针叶林内的正效应不仅在处理地表现出来，而且也明显提高了对照样地土壤动物类群的生物量。与实验处理前（2003 年 7 月）相比，2004 年 4 月和 8 月季风林对照样地土壤动物类群生物量分别提高 13.06% 和 43.87%，而在针叶林中则分别提高 284.28% 和 284.56%。因此，实验期间针叶林总体上，不仅氮处理地，而且对照样地土壤动物类群生物量也达到了季风林的水平。这明显不符合两林地的自然差异和对照样地的属性，实验处理前的本底调查结果也证明了这一点：其时针叶林土壤动物类群生物量只相当于季风林的 18.52% ~ 31.53%。出现这种情况的原因是在实验后期针叶林内一些土壤动物类群，尤其是苔甲科幼虫普遍大量发生，使得针叶林各处理（包括对照样地）都得以明显提高。考虑到土壤动物的活动性，尤其是鞘翅目成虫（如苔甲科昆虫）的飞翔能力，可以推测，在氮处理的刺激下，处理样地得到显著增长的动物类群进一步扩散到了邻近的对照样地。这提示，实验设计之初所考虑的不同处理样地之间的间隔措施并不完善，至少对于某些动物类群来说是这样，进一步研究中必须关注这个问题。虽然如此，这个结果也证明了针叶林土壤动物在氮处理下得到了明显的发展。

参考文献：

Aber JD, Nadelhoffer KJ, Steudler P, Melillo JM. 1989. Nitrogen saturation in northern forest ecosystems [J]. *Bioscience*, **39**: 378 - 386.

Aber JD, Magill AH, McNulty SG, Boone R, Nadelhoffer KJ, Downs M, Hallett RA. 1995. Forest biogeochemistry and primary production altered by nitrogen saturation [J]. *Water Air Soil Pollut*, **85**: 1665 - 1670.

Aber JD, Mcdowell WH, Nadelhoffer KJ, Magill A, Berntson G, Kamakea M, McNulty SG, Currie W, Rustad L, Fernandez I. 1998. Nitrogen saturation in temperate forest ecosystems, hypotheses revisited [J]. *Bioscience*, **48**: 921 - 934.

Bergkvist B, Folkeson L. 1992. Soil acidification and element fluxes of a *Fagus sylvatica* forest as influenced by simulated nitrogen deposition [J]. *Water Air Soil Pollut*, **65**: 111 - 133.

Boxman AW, Blanck K, Brandrud TE, Emmett BA, Gundersen P, Hogervorst RF, Kjonaas OJ, Persson H, Timmermann V. 1998. Vegetation and soil biota response to experimentally-changed nitrogen inputs in coniferous forest ecosystems of the NITREX project [J]. *For Ecol Manage*, **101**: 65 - 79.

Fenn ME, Poth MA, Aber JD, Baron JS, Bormann BT, Johnson DW, Lemly AD, McNulty SG, Ryan DF, Stottlemyer R. 1998. Nitrogen excess in north American ecosystems: Predisposing factors, ecosystem responses, and management strategies [J]. *Ecol Appl*, **8**: 706 - 733.

Foster NW, Hazlett PW, Mcolson JA, Morrison IK, White EH, Wisniewski J. 1989. Ion leaching from a sugar maple forest in response to acidic deposition and nitrification [J]. *Water Air Soil Pollut*, **48**: 251 - 261.

Gundersen P, Emmett BA, Kjonaas OJ, Koopmans CJ, Tietema A. 1998. Impact of nitrogen deposition on nitrogen cycling in forest: A synthesis of NITREX data [J]. *For Ecol Manage*, **101**: 37 - 56.

Hall SH, Matson PA. 1999. Nitrogen oxide emission after nitrogen additions in tropical forests [J]. *Nature*, **400**: 152 - 155.

Hou AM, Peng SL, Zhou GY. 2002. Tree-ring chemical changes and possible impacts of acid precipitation in Dinghushan, South China [J]. *Acta Ecol Sin*, **22** (9): 1552 - 1559. [侯爱敏，彭少麟，周国逸. 2002. 鼎湖山地区马尾松年轮元素含量与酸雨的关系. 生态学报，**22** (9)：1552 - 1559.]

Huang LX, Sheng SH. 1996. A study of the effects of soil animals on soil nutrients in non-tillage ecosystem [J]. *Rural Eco-Environ*, **12** (4): 8 - 10. [黄伦先，沈世华. 1996. 免耕生态系统中土壤动物对土壤养分影响的研究. 农村生态环境，**12** (4)：8 - 10.]

Kros J, De Vries W, Janssen PHM, Bak CI. 1993. The uncertainty in forecasting trends of forest soil acidification [J]. *Water Air Soil Pollun*, **66**: 29 - 58.

Liao CH. 1996. Change of soil fauna and microbe community during the succession of forest in subtropical China [A]. In: Peng SL. 1996. Community Dynamics of Forest in Subtropical China [M]. Beijing: Science Press, 252 - 261. [廖崇惠. 1996. 南亚热带森林生态系统演替过程动物和微生物群落的演变. 见：彭少鳞. 1996. 南亚热带森林群落动态学. 北京：科学出版社，252 - 261.]

Magill AH, Aber JD, Hendricks JJ, Bowden RD, Melillo JM, Steudler PA. 1997. Biogeochemical response of forest ecosystems to simulated chronic nitrogen deposition [J]. *Ecol Appl*, **7**: 402 - 415.

Magill AH, Aber JD, Berntson GM, McDowell WH, Nadelhoffer KJ, Mellilo JM, Steudler P. 2000. Long-term nitrogen additions and nitrogen saturation in two temperate forests [J]. *Ecosystems*, **3**: 238 - 253.

Matson PA, Mcdowell WH, Townsend AR, Vitousek PM. 1999. The globalization of N deposition: Ecosystem consequences in tropical environments [J]. *Biogeochem*, **46**: 67-83.

McNulty SG, Aber JD, Newman SD. 1996. Nitrogen saturation in a high elevation New England spruc-fir stand [J]. *For Ecol Manage*, **84**: 109-121.

Mo JM, Brown S, Peng SL, Kong GH. 2003. Nitrogen availability in disturbed, rehabilitated and mature forests of tropical China [J]. *For Ecol Manage*, **175** (3): 573-583.

Ren R, Mi FJ, Bai RB. 2000. A chemometrics analysis on the data of precipitation chemistry of China [J]. *J Beijing Polytech Univ*, **26** (2): 90-95. [任 仁，米丰杰，白乃彬. 2000. 中国降水化学数据的化学计量学分析. 北京工业大学学报, **26** (2): 90-95.]

Sarathchandra SU, Ghani A, Yeates GW, Burch G, Cox NR. 2001. Effect of nitrogen and phosphate fertilisers on microbial and nematode diversity in pasture soils [J]. *Soil Biol Biochem*, **33**: 953-964.

Sulkava P, Huhta V, Laakso J. 1996. Impact of soil faunal structure on decomposition and N-mineralization in relation to temperature and soil moisture in forest soil [J]. *Pedobiologia*, **40**: 505-513.

Vitousek PM, Aber CJ, Howarth RW, Likens GE, Matson PA, Schindler DW, Schlesinger WH, Tilman GD. 1997. Human alteration of the global nitrogen cycle: Causes and consequences [J]. *Ecol Appl*, **7** (3): 737-750.

Watmough SA, Hutchinson TC, Sager EPS. 1999. The impact of simulated acid rain on soil leachate and xylem chemistry in a Jack pine (*Pinus banksiana* Lamb) stand in northern Ontario, Canada [J]. *Water Air Soil Pollun*, **111**: 89-108.

Whalen JK, Parmelee RW, Edwards CA. 1998. Population dynamics of earthworm communities in corn agroecosystems receiving organic or inorganic fertilizer amendments [J]. *Bio Fertil Soils*, **27**: 400-407.

Wright RF, Rasmussen L. 1998. Introduction to the NITREX and EXMAN projects [J]. *For Ecol Manage*, **101**: 1-7.

Yi WY. 1998. Pictorical Keys to Soil Animals of China [M]. Beijing: Science Press. [尹文英. 1998. 中国土壤动物检索图鉴. 北京：科学出版社.]

Zhang DQ, Ye WH, Yu QF. 2000. The litter fall of representative forests of successional series in Dinghushan [J]. *Acta Ecol Sin*, **20** (6): 938-944. [张德强，叶万辉，余清发. 2000. 鼎湖山演替系列中代表性森林凋落物研究. 生态学报, **20** (6): 938-944.]

Zhang RZ. 1980. Foreign research of soil fauna in ecosystem [J]. *Res For Ecosyst*, (1): 257-264. [张荣祖. 1980. 生态系统中土壤动物国外研究动态. 森林生态系统研究, (1): 257-264.]

Zhen LY, Gui H. 1999. Insect Classification [M]. Nanjing: Normal University Press. [郑乐怡，归 鸿. 1999. 昆虫分类学. 南京：南京师范大学出版社.]